

Prof. dr hab. Marek Banaszkiewicz

Warszawa, 30.06.2016

Centrum Badań Kosmicznych PAN

ul. Bartycka 18a, 00-716 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Joanny Kozakiewicz

pt.

„Investigation of the Martian subsurface by analysis of the Schumann resonance parameters”

1. Uwagi ogólne

Jednym z istotnych problemów badań planet Układu Słonecznego jest kwestia odtworzenia ewolucji Marsa w aspekcie możliwości istnienia, rozwoju i przetrwania prymitywnych form życia na tej planecie. Przesłanką skłaniającą do rozważania hipotezy o istnieniu w przeszłości na tej planecie organizmów biologicznych są obserwowane na jej powierzchni formy morfologiczne wskazujące na istnienie kiedyś na Marsie wody w stanie ciekłym. Znane na Ziemi formy biologiczne wymagają ciekłej wody jako środowiska, bez którego nie mogłyby się rozwijać. Istnieją dowody, że pod powierzchnią Marsa znajdują się duże zasoby zestalonej wody – lodu, niejasna jest natomiast kwestia, czy głębiej pod powierzchnią planety istnieje woda w stanie ciekłym.

Mgr Joanna Kozakiewicz podjęła w swojej rozprawie doktorskiej próbę przedstawienia metody pomiarowej pozwalającej, być może, na rozstrzygnięcie tej kwestii. Opiera się ona na badaniu częstotliwości rezonansów Schumanna – fal elektromagnetycznych tworzących się w naturalnym sferycznym rezonatorze utworzonym przez dwie przewodzące warstwy: powierzchnię Marsa i jonosferę planety. Rezonanse Schumanna są od lat obserwowane na Ziemi, powinny zatem występować również na Marsie, jednak w odróżnieniu od naszej planety, wnętrza rezonansowa Marsa charakteryzuje się znacznie niższą przewodnością gruntu, co istotnie komplikuje opis teoretyczny fal rezonansowych.

Autorka rozprawy stworzyła, w oparciu o prace własne i bardzo bogatą literaturę przedmiotu, analityczny opis złożonego zagadnienia elektromagnetycznego i zaproponowała zestaw przyrządów pozwalających na pomiar częstotliwości rezonansowych na powierzchni Marsa.

Opracowana przez mgr Kozakiewicz metoda analityczna pozwala na parametryczny opis częstotliwości rezonansowych w funkcji, między innymi, przewodności warstw podpowierzchniowych planety. Dzięki temu można, odwracając wynik pomiarów, określić czy głębsze warstwy Marsa zawierają wodę w stanie ciekłym. Jest to, zgodnie z moją wiedzą, pierwsza tak kompletna próba rozwiązania problemu o istotnym znaczeniu dla badań Marsa. Już z tego powodu należy docenić podjęte przez autorkę zadanie badawcze i wysoko ocenić jej ambicję w podejmowaniu ważnych problemów naukowych. Realizacja przedstawionej metody pomiarowej nie będzie jednak łatwa, ze względu na sporą masę przyrządu, silną konkurencję w aplikowaniu o miejsce dla instrumentów naukowych na misjach marsjańskich i bardzo wysokie koszty przedsięwzięcia. Mimo to, trzeba życzyć mgr Kozakiewicz, by jej praca znalazła praktyczne zastosowanie w jednej z przyszłych misji do Marsa.

2. Forma i struktura pracy

Praca jest napisana zwięźle, bowiem opis wielu aspektów podjętego problemu badawczego zajmuje w sumie 175 stron, włączając literaturę przedmiotu. Jest to niewątpliwą zaletą pracy, chociaż, w moim przekonaniu, niektóre zagadnienia mogłyby być przedstawione obszerniej, kosztem innych, które można by skrócić. Praca napisana jest w języku angielskim, co uznaję za dobry pomysł, pozwalający na uniknięcie zawsze kłopotliwego poszukiwania polskich odpowiedników angielskich terminów naukowych. Pracę czyta się dobrze, tylko czasami trzeba się chwile zastanowić nad składnią zdania. Redakcja pracy jest staranna, chociaż autorka nie uniknęła kilku błędów edytorskich, które jednak nie wpływają istotnie na wywód naukowy przedstawiony w pracy. Kilka szczegółowych uwag dotyczących spraw redakcyjnych to:

- Numeracja podrozdziałów rozdziału pierwszego pracy zaczyna się od 5,
- We wzorze (1.43) po prawej stronie brak jest ω^2 ,
- We wzorze (3.2) jest operator Laplace'a zamiast operatora gradientu.

Praca składa się z Wstępu, 5 rozdziałów, Wniosków i obszernego zestawu literatury. Odpowiednia liczba ilustracji pomaga w zrozumieniu tekstu. Rysunki są starannie przygotowane i dobrze opisane.

We Wstępie autorka przedstawia przedmiot rozprawy i jej cel badawczy: wykorzystanie rezonansów Schumanna czyli fal elektromagnetycznych o bardzo niskiej częstotliwości (kilkakilkanaście Hz) do badania warstw podpowierzchniowych Marsa do głębokości sięgającej kilka-kilkanaście km.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera kolejno tło historyczne związane z pojęciem i pomiarami rezonansów Schumanna w otoczeniu Ziemi i podstawy teoretyczne analizy rezonansów Schumanna. Autorka zapożycza tu obficie z literatury przedmiotu wprowadzając kolejno: (i) rezonanse we wnętrze sferycznej o doskonale przewodzących powierzchniach (ściankach rezonatora) dolnej i górnej, czyli powierzchni Ziemi i jonosfery (za Jacksonem), (ii) głębokość naskórkową (wnikania) pola w przypadku powierzchni (gruntu) o skończonym przewodnictwie, (iii) wysokości charakterystyczne rezonatora, nazwane później elektryczną i magnetyczną, opisujące efekty związane z propagacją fal we wnętrze o skończonej przewodności ścianek oraz (iv) linię transmisyjną złożoną z elementów dyskretnych. W dalszej części rozdziału przedstawione są opisy jonosfery i powierzchni Ziemi, ze szczególnym uwzględnieniem wartości przewodnictwa i przenikalności elektrycznej w tych ośrodkach. Zastrzeżenie jakie mam do tego rozdziału polega na zbyt zwięzłym opisie (jedno zdanie) kluczowych dla metody TDTE stosowanej przez autorkę w obliczeniach parametrów linii transmisyjnej, takich jak rezystancja, konduktancja, pojemność i indukcyjność i ich związku z wartościami pól elektromagnetycznych, ładunków i strumieni, czyli parametrów fizycznych stosowanych w opisie rezonatorów i falowodów.

Drugi rozdział zawiera przegląd marsjańskich misji satelitarnych i lądowników, opis różnych aspektów środowiska Marsa, w szczególności: (i) orbitalnych i rotacyjnych parametrów planety, (ii) jego magnetosfery, (iii) atmosfery planety z naciskiem na jonosferę i jej oddziaływanie z wiatrem słonecznym, (iv) ukształtowania powierzchni Marsa i parametrów fizycznych powierzchni. Szczególnie dużo uwagi poświęca autorka opisowi jonosfery Marsa. Jest to kompendium wiedzy o różnych procesach elektrycznych zachodzących w atmosferze i jonosferze Marsa, w większości jednak nie wykorzystane w kolejnych rozdziałach pracy. Dla mnie szczególnie interesujące byłyby obszerniejsze rozważania, jak silne prądy generowane w wyładowaniach elektrycznych opisanych w podrozdziale 2.4.3 przekładają się na wzbudzenia modów rezonansowych, w szczególności na ich amplitudy. Znalazłem krótkie omówienie tego problemu na stronie 117 rozprawy, ale biorąc pod uwagę, że jest to kluczowe zagadnienie przy planowaniu eksperymentu, wykonaniu pomiarów i interpretacji wyników oczekiwałbym dłuższej dyskusji.

Rozdział trzeci opisuje analityczny model propagacji fal bardzo niskiej częstotliwości (EFL) w falowodzie marsjańskim utworzonym przez jonosferę i powierzchnie Marsa. Oryginalnym wkładem autorki jest tu wielowarstwowy model płaszcza planety, w którym kolejne warstwy różnią się przewodnictwem elektrycznym i grubością. Mgr Kozakiewicz rozważa modele trzy-

i dwuwarstwowe obliczając analitycznie dla każdego z nich głębokość elektryczną i magnetyczną. Modele dwuwarstwowe są scharakteryzowane trzema parametrami (przewodnictwa warstw i grubość pierwszej warstwy), a modele trzywarstwowe pięcioma parametrami (przewodnictwa warstw i grubości warstwy pierwszej i drugiej). Autorka rozważa różne modele fizyczne warstw wybierając do porównań trzy: (i) jednowarstwowy model suchych skał, (ii) trójwarstwowy model solankowy, w którym pierwsza warstwa składa się z porowatych skał zawierających zestalony i zanieczyszczony solą lod, druga warstwa to skały z porami wypełnionymi solanką, a trzecia to sucha skała, (iii) trójwarstwowy model wodny, o strukturze podobnej do modelu solankowego, jednak ze znacznie czystszy lodem i wodą, zatem o istotnie niższym przewodnictwie elektrycznym. Rozdział jest dobrze skonstruowany i napisany.

Rozdział czwarty zawiera wyniki obliczeń metodą TDTE częstotliwości pierwszych trzech modów rezonansu Schumanna oraz współczynników zanikania fal i ich prędkości fazowych dla różnych modeli gruntu marsjańskiego. Jest to praktyczne zastosowanie analitycznego modelu przedstawionego przez autorkę w poprzednim rozdziale rozprawy. Ważnym elementem tego rozdziału jest porównanie wyników modeli rozważanych w rozprawie z wynikami otrzymanymi innymi metodami przez różnych autorów. Niemniej istotna jest dyskusja wyników w zależności od przyjętych parametrów wejściowych modelu. W sumie jest to rozdział o dużej ilości informacji ważnych z punktu widzenia tej rozprawy.

Rozdział piąty koncentruje się na przedstawieniu koncepcji eksperymentu mierzącego fale ELF na Marsie. W praktyce jest to przedstawienie pomysłu przyrządu, a raczej grupy przyrządów przeznaczonych do badania rezonansów Schumanna na Marsie. Rozdział zawiera kolejno: (i) przegląd badań eksperymentalnych dotyczących procesów elektrycznych na Marsie, (ii) metod pomiaru fal ELF na Ziemi, (iii) celów i opisu proponowanego eksperymentu na Marsie. Jest to dobre zwieńczenie rozprawy doktorskiej mgr Joanny Kozakiewicz, pokazuje bowiem związek modeli i obliczeń przedstawionych wcześniej z realnym eksperymentem możliwym do przeprowadzenia na jednej z przyszłych misji marsjańskich. Ponieważ przyrząd pomiarowy bazuje na instrumentach wykorzystywanych do badań rezonansów Schumanna na Ziemi, nie mam wątpliwości, że idea pomiaru i jego fizyczna realizacja są poprawne. Moje wątpliwości budzi jedynie znaczna masa proponowanego instrumentu. Wrócę do tej kwestii w dalszej części recenzji.

Podsumowanie pracy zawiera streszczenie jej zawartości i wskazuje na znaczenie pomiarów fal ELF dla badań nad jonosferą i litosferą Marsa.

Bogaty spis literatury zawiera 322 pozycje.

3. Cele pracy i ich realizacja

Autorka stawia przed sobą trzy cele, które chciałby zrealizować w rozprawie doktorskiej.

Po pierwsze, mgr Kozakiewicz chciała wprowadzić analityczną metodę obliczania rezonansów Schumanna dla Marsa w przypadku rezonatora o niedoskonałych parametrach. Obydwie bowiem warstwy graniczne: jonosfera i grunt marsjański są przewodnikami o skończonym, a jeśli chodzi o grunt dość niskim w porównaniu z Ziemią, przewodnictwie elektrycznym. Oryginalnym wkładem mgr Kozakiewicz jest opracowanie modeli wielowarstwowych gruntu, pozwalających na uwzględnienie w obliczeniach warstw podpowierzchniowych o różnej zawartości wody lub solanki. Ten cel autorka zrealizowała bez zarzutu, a słuszność wprowadzonej metody udowodniła porównując jej wyniki z rezultatami obliczeń numerycznych innych autorów.

Drugim celem autorki rozprawy była próba pokazania, że możliwe jest wnioskowanie o własnościach gruntu marsjańskiego poprzez analizę wartości rezonansów Schumanna obliczonych wcześniej wprowadzoną metodą analityczną. W istocie jest to pomysł na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego: porównujemy model analityczny z pomiarami i tak dobieramy parametry modelu, by uzyskać najlepsze dopasowanie do wyników pomiarów. Autorka nie dysponuje wynikami pomiarów, zatem mogła jedynie przedstawić zależność wyznaczonych analitycznie wartości rezonansów Schumanna od trzech (model dwuwarstwowy gruntu) lub pięciu (model trójwarstwowy) parametrów modelu. Mimo wielu kolorowych wizualizacji w rozdziale 4 pokazujących zależność częstotliwości pierwszego rezonansu od różnych par parametrów ta część pozostawia niedosyt. Po pierwsze przedstawione wyniki pokazują, że w pewnych zakresach parametrów rezonanse Schumanna słabo się zmieniają, lub mówią inaczej, nie są zbyt czułe na zmiany parametrów modelu. W takich przypadkach metoda odwrotna zawodzi. Dobrze byłoby przeprowadzić analizę wrażliwości zmian częstotliwości rezonansowej w zależności od zmian parametrów (na przykład poprzez policzenie pochodnej numerycznej) i zamieścić w rozprawie paragraf podsumowujący taką analizę. Po drugie, w rozprawie brak zupełnie analizy błędów. Na całkowity błąd składać się będą błąd metody (analitycznej) i błąd pomiaru. Z przedstawionego w rozprawie porównania wyników stosowanej przez autorkę metody z wynikami obliczeń numerycznych (Tabela 11) wynika, że błąd metody to około 3%. Błąd pomiaru wynika m.in. z czasu integracji sygnałów T , a dla

$T=300$ sec stosunek sygnału do szumu wynosi 26 dB (strona 131 rozprawy). Po przeliczeniu wprost na stosunek szumu do sygnału daje to ca. 5% błędu. Zakładając, że tego samego rzędu błąd występuje przy wyznaczaniu częstości rezonansowej z pomiarów, całkowity błąd to minimum 5%, co przy częstości rezonansowej 8 Hz daje niepewność rzędu 0.4 Hz. Taki błąd bardzo utrudnia wyznaczenie parametrów gruntu, bowiem odpowiada np. połowie kolorowej skali na rysunkach 49 i 50. Jeśli błąd jest rzeczywiście tak znaczący, to kluczowy dla argumentacji o umieszczeniu przyrządu pomiarowego na pokładzie przyszłej sondy marsjańskiej rysunek 58, pokazujący zależność częstotliwości rezonansowej od zawartości wody w gruncie należy traktować z dużą ostrożnością – dla $GEL > 15$ m, wszystkie wartości częstotliwości rezonansowej leżą w granicach błędu.

Trzecim celem pracy było zaproponowanie instrumentu przeznaczonego do pomiarów rezonansów Schumanna na powierzchni Marsa i uzasadnienie, że pomiary takie mogą być źródłem cennych informacji nie tylko o warstwach podpowierzchniowych planety, ale też o atmosferycznym systemie elektrycznym Marsa, w szczególności o liczbie, częstości i natężeniu wyładowań elektrycznych w atmosferze. Rozdział bazuje na doświadczeniach autorki i grupy badawczej do której należy z pomiarami rezonansów Schumanna w rezonatorze ziemskim. Widać tutaj dużą wiedzę o konstruowaniu instrumentów pomiarowych i kulturę w planowaniu eksperymentów. Nie mam wątpliwości, że grupa ta byłaby w stanie opracować, przygotować i wykonać instrument lub instrumenty, które działałyby na Marsie. Moje zastrzeżenia budzą dwie kwestie. Pierwszą jest masa planowanego przyrządu (i jego rozmiary). Zabranie 18 kg na Marsa to duże przedsięwzięcie. Dość powiedzieć, że cały zestaw przyrządów łazika Curiosity to 75 kg, przy masie łazika sięgającej 900 kg. Dodatkowo instrument mierzący fale ELF miałby być przeniesiony z pokładu łazika lub lądownika na powierzchnię Marsa, co wymaga niewielkiego dźwigu. Razem z masą instrumentu sumuje się to do 25-30 kg. Ponieważ koszty misji marsjańskich są wysokie (Curiosity kosztowała 2.5 mld \$), zatem, w proporcji, koszt wysłania takiego instrumentu na Marsa to obecnie co najmniej 0.5 mld \$. Zestaw trzech instrumentów kosztowałby odpowiednio drożej. Wysłanie tak kosztownego przyrządu na Marsa wymagałoby dużej pewności, że rezultaty badawcze będą przełomowe, np. odkrycie śladów życia lub środowiska, które istnienie życia na Marsie teraz lub w przeszłości czyniłoby bardzo prawdopodobnym. Po przeczytaniu rozprawy nie mam przekonania, że taka pewność byłaby uzasadniona. Dlatego szukałbym rozwiązań technicznych, jeśli takowe istnieją, które zredukowałyby masę przyrządu poniżej 5 kg, nawet kosztem pewnych kompromisów badawczych. Druga kwestia dotyczy wzbudzeń rezonansów ELF. Na stronie 134 rozprawy

autorka zakłada, że intensywność wyładowań elektrycznych wzbudzających fale ELF wynosi na Marsie $10^2 \text{ C}^2 \text{ km}^2/\text{s}$ i jest o rząd wielkości mniejsza niż na Ziemi. Usiłowałam dociec skąd się bierze takie założenie, ale po przeczytaniu przywoływanego przez autorkę podrozdziału 2.4.3 nie uzyskałam odpowiedzi. Kolejna kwestia związana z falami ELF na Marsie to ich duże tempo zaniku – współczynnik Q ma na Marsie wartość 2 i jest dwa razy mniejszy niż na Ziemi. Oznacza to zapewne, że mody rezonansowe szybko zanikają w czasie, co powinno mieć wpływ na intensywność zintegrowanego po czasie sygnału mierzonego przez przyrząd. Byłbym wdzięczny za komentarz autorki w tej sprawie.

Na koniec dwie uwagi ogólne. Pierwsza z nich dotyczy zawartości informacyjnej w poszczególnych rozdziałach pracy. Mam wrażenie, że mgr Kozakiewicz dzieli się chętnie z czytelnikami wiedzą szczegółową, którą zdobyła starając się przygotować rzetelnie dane wejściowe do swoich modeli, natomiast bardzo skrótowo traktuje zagadnienia techniczne, nad którymi dobrze panuje i uznaje, że wszyscy czytający rozprawę tę wiedzę też posiadli. Powoduje to u czytelnika pewien dyskomfort, bowiem po przeczytaniu dwudziestu stron rozważań o jonosferze Marsa, zastanawia się on jak ta wiedza będzie później skonsumowana w rozprawie i stwierdza, że w modelu wykorzystuje się jedynie profil wysokościowy przewodnictwa elektrycznego i dwie charakterystyczne wysokości. Z drugiej strony zagadnienia związku modelu linii transmisyjnej i jej parametrów z modelem polowym, kwestia pobudzania modów rezonansowych przez zmienne w czasie prądy związane z wyładowaniami atmosferycznymi, czy też przedstawienie założeń prowadzących do, kluczowego dla pomiarów, wzoru (5.4) na widmo mocy rezonansu Schumanna są przedstawione bardzo skrótowo. Trzeba jednak przyznać, że autorka, w większości wypadków, zadbała o to by niezbędne informacje i parametry można było w pracy odnaleźć.

Druga uwaga dotyczy kwestii podstawowej. Czy model sferycznego rezonatora, przyjmowany dla Ziemi, jest dobry dla Marsa. Problem polega na tym, że różnice wysokości różnych punktów na powierzchni Ziemi są niewielkie – średni poziom lądów to ok. 900 m n.p.m., a różnice w poziomie powierzchni mórz nie przekraczają niewielkich kilkuset metrów. Na Marsie mamy dwie półkule, których średnie wysokości różnią się o 8-10 kilometrów. Przy założonym poziomie jonosfery na wysokości 80 km daje to 10% różnicę w odległości ścianek rezonatora. Możemy mieć zatem do czynienia z dwoma półkolistymi rezonatorami o różnych parametrach geometrycznych. W takiej sytuacji następują odbicia fal na granicy między rezonatorami, mieszanie modów, etc.. W pracy nie ma wzmianki na ten temat, a dobrze byłoby taka podstawową kwestię przedyskutować.

4. Podsumowanie

Praca jest bardzo rzetelną próbą rozwiązania istotnego zagadnienia naukowego. Autorka zadbała o wyczerpujące przedstawienie materiału faktograficznego i jasno przedstawiła swoje cele badawcze. Warto podkreślić kompleksowe podejście do zagadnienia, obejmujące podstawy teoretyczne, obliczenia modelowe i propozycję przyrządu pomiarowego. Moje uwagi krytyczne nie wpływają na całościową ocenę pracy, którą uważam za ambitną próbę zmierzenia się ze złożonym problemem naukowym.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr Joanny Kozakiewicz spełnia wymogi określone w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r.* i wnioskuję o dopuszczenie jej autorki do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.



Marek Banaszkiewicz